

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.010

# 四川太和钒钛磁铁矿地球物理特征及其找矿意义

杨雪, 葛藤菲, 范正国, 黄旭钊, 何敬梓, 田嵩,  
李靖, 杨海, 骆遥, 李冰

(中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要:** 本文以四川太和钒钛磁铁矿地质成矿特征为研究背景, 以高精度航磁数据为研究基础, 辅以区域重力数据, 结合实测岩(矿)石物性资料, 对已知铁矿及其周边地区的地球物理特征进行研究分析, 优选 M47、M47-1、M47-2、M47-3、M47-4 5 处异常。5 处异常地质成矿环境较好, 地球物理特征明显, 磁场上表现为椭圆状、似椭圆状局部升高正磁异常, 在重力垂向二阶导数场中反映为鼻状突起、似椭圆状局部重力高值异常; 依据物性资料, 钒钛磁铁矿和辉长岩(含矿)磁性最强、密度最大, 可引起明显的高磁、高重异常; 结合地面踏勘结果, 认为 M47 航磁异常与已知矿体有关; M47-1、M47-2 为隐伏基性侵入岩(含矿)引起, 利用 GeoProbe 软件和 GMVPS 软件进行 2.5D 反演, 估算资源量约为 4.69 亿吨, 具有一定的找矿潜力, 值得进一步深入工作; M47-3、M47-4 两处异常范围内可能存在隐伏的磁性矿体, 并具有一定的埋深, 应予以重视, 建议在异常范围内开展地面三级查证工作, 寻找与基性侵入岩相关的钒钛磁铁矿。

**关键词:** 钒钛磁铁矿; 辉长岩; 航磁异常; 地球物理特征

**中图分类号:** P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2024)01-0077-10

## Geophysical Characteristics and Prospective Exploration of Vanadium-Titanium-Magnetite Deposit in Taihe Area, Sichuan

YANG Xue, GE Tengfei, FAN Zhengguo, HUANG Xuzhao, HE Jingzi,  
TIAN Song, LI Jing, YANG Hai, LUO Yao, LI Bing

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, we use regional geological metallogenic characteristics of Taihe area in Sichuan as the research background, the high-precision airborne magnetic data as the research foundation, supplements it with regional gravity data, then combines with the measured physical properties of rocks (minerals), to study and analyze the geophysical characteristics of known iron ores and their surrounding areas. Finally, we select 5 anomalies at M47, M47-1, M47-2, M47-3, and M47-4. These anomalies demonstrate typical geophysical characteristics, signifying potential mineralization. The magnetic anomaly presents as an elliptical local bulge with a positive magnetic anomaly, whereas the vertical second-order gravity derivative field resembles a nasally bulging elliptical positive anomaly. Notably, vanadium-titanium magnetite and gabbro (ore-bearing) exhibit the strongest magnetism and highest density, resulting in significant magnetic anomalies and strong anomalies, as corroborated by geophysical data. Through ground surveying, we established a correlation between the M47 magnetic

收稿日期: 2023-11-30; 改回日期: 2024-01-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2903704); 中国地质调查局项目“重点地区铜多金属矿航空物探遥感调查”(DD20230351)和“重点地区航空地球物理调查”(DD20230012)。

作者简介: 杨雪, 女, 硕士, 高级工程师, 1983 年出生, 地球探测与信息技术专业, 主要从事地球物理勘探技术研究。

Email: 344189755@qq.com。

通信作者: 葛藤菲, 男, 博士, 高级工程师, 1988 年出生, 构造地质学专业, 主要从事矿产勘查与找矿预测。

Email: 564465031@qq.com。

anomaly and the known orebody, while interpreting M47-1 and M47-2 as concealed ore-bearing basal intrusive rocks. Utilizing 2.5-D inversion with the GeoProbe and GMVPS software, we estimated the M47-1 and M47-2 anomalies to represent an orebody with 469 million tons of resources, highlighting the massive potential for further exploration. The M47-3 and M47-4 anomalies suggest the possible presence of buried magnetic ore bodies at a certain depth, warranting further investigation to explore the potential of vanadium-titanium magnetite associated with mafic intrusive rocks.

**Key words:** vanadium titanium magnetite; gabbro; aeromagnetic anomaly; geophysical characteristics

## 0 引言

太和铁矿位于四川省西昌市,距成昆铁路和雅攀高速公路 7 km,东邻安宁河,与安宁河谷平原隔河相望,该矿区东西长 3700 m、南北宽 3500 m,与攀枝花、红格、白马铁矿齐名,成为攀西地区著名的四大钒钛磁铁矿之一。20 世纪 60 年代,中国自然资源航空物探遥感中心(简称航遥中心)曾在川南滇北地区开展 1:200000 航空磁力测量工作,测得 M47 航磁异常的磁场特征表现为强度大、梯度陡的正负伴生异常,由于该异常处于太和钒钛磁铁矿区内,经查证该处航磁异常为已知磁铁矿及岩体共同引起的。20 世纪 60 至 80 年代,太和铁矿经历了两次勘查,矿区浅部提交铁矿石资源储量 12.7 亿吨<sup>[1]</sup>。2010 年,四川省冶金地质勘查院执行的整装勘查项目在四川省西昌市钒钛磁铁矿延伸详查取得重大突破<sup>[1]</sup>。2014 年,航遥中心在攀枝花—安益地区开展了 1:50000 高精度航磁测量工作<sup>[2]</sup>,在开展解释研究工作中,发现已知太和铁矿南侧正磁异常对应印支期碱性正长岩,北西侧正磁异常对应印支期碱性正长岩及晚二叠世玄武岩,据物性资料,南侧和北西侧出露的岩石磁性不足以引起如此强度的正磁异常,故此推测已知矿区的南侧及西北侧可能存在未探明的铁矿。近年来,已知太和铁矿区找矿工作程度相对较高,而已知矿周边地区未进一步开展相关研究工作及找矿工作部署。本文针对四川西昌太和地区(包括太和铁矿区及其南侧和西北侧)开展综合研究,以区域地质成矿特征为研究背景,1:50000 高精度航磁数据为研究基础,辅以区域重力数据,对已知矿及其周围地区的地质、地球物理进行综合分析,优选出 5 处矿致异常,即 M47、M47-1、M47-2、M47-3、M47-4。结合地面踏勘结果,认为 M47 航磁异常与已知太和钒钛磁铁矿有关,M47-1、M47-2、M47-3、M47-

4 四处航磁异常可能与隐伏含矿地质体有关。利用中国自然资源航空物探、遥感中心(航遥中心)自主研发的 GeoProbe 软件(Eulers 深度反演模块)和重磁异常剖面解释系统(GMVPS)对提取的航磁异常剖面数据进行 2.5D 反演计算,推断航磁异常区含隐伏磁性体的埋深、形态等特征,且具有较好找矿潜力,因此建议在太和铁矿南侧及西北侧地区 4 处重点航磁异常范围内开展下一步找矿工作部署,进而实现四川西昌太和地区的找矿突破。

## 1 成矿地质背景

四川西昌太和地区位于康滇地轴北段,由于该区地处“川滇南北构造岩浆岩带”中段,区内岩浆活动频繁而强烈,具有多期次、多岩类、规模大、分布广的特点<sup>[1-2]</sup>。该地区曾是一个晚古生代—中生代古裂谷,层状岩体是裂谷早期地幔上拱阶段的产物<sup>[3-5]</sup>。太和层状基性侵入岩体位于峨眉山大火成岩省内,该侵入岩形成于二叠纪,与二叠纪峨眉山玄武岩、三叠纪碱性正长岩、碱性花岗岩相伴产出<sup>[6-10]</sup>。华力西期层状基性—超基性岩体、峨眉山玄武岩、印支期碱性岩形成“三位一体”,是攀西钒钛磁铁矿最明显的宏观找矿标志<sup>[11]</sup>。

区内的基底为双层基底,包括结晶基底和褶皱基底。结晶基底是由下元古界中、深变质岩系组成,褶皱基底由中—上元古界浅变质岩系组成的。双层基底与上覆沉积盖层呈角度不整合接触,部分地区缺失中—上元古界的浅变质岩系,其下元古界的中、深变质岩系直接与上覆震旦系呈角度不整合接触<sup>[12]</sup>。其他出露地层包括三叠系、侏罗系、白垩系上统小坝组、新近系上新统昔格达组、第四系等。三叠系、侏罗系,岩性为砂岩、粉砂岩、泥灰岩、页岩等;白垩系小坝组,岩性为砖红色泥岩、砂岩、粉砂岩,厚 365 m,地表与太和辉长岩体呈断层接触,深部为角度不整合接

触；新近系昔格达组，厚 300~460 m，岩性为砾岩、砂砾岩、粉砂岩等，与太和辉长岩体和小坝组均呈不整合接触；第四系在矿区分布广，由冰碛岩和冲积层、坡积层组成，厚 0~510 m(图 1)。

太和铁矿区位于磨盘山断裂带与安宁河断裂带之间，区内断层主要为北北西向和北西向，发育在辉长岩体西部边缘地区，控矿作用较为明显，部分小断裂将已知太和铁矿的各矿段进行了切割错位，对矿体有不同程度的破坏，错动距离一般不大，为后期岩脉的侵入、混染提供了空间。区内岩浆岩比较发育，太和地区出露大片华力西期层状基性岩体，岩体走向近东西向。太和层状辉长岩是已知钒钛磁铁矿的成矿母岩，该岩体走向近东西向，倾向南，倾角  $48^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，岩体呈板状或盆状，分异良好，相带、韵律层清楚，原生构造发育。岩体内钒钛磁铁矿体呈似层状，沿南北

向大致平行排列；矿体总体走向近东西，向南倾斜，倾角  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ；矿石矿物以钛磁铁矿、钛铁矿为主，少量赤(镜)铁矿、硅酸铁、菱铁矿、硫铁矿等。太和岩体从下向上，岩性变化较大，根据岩石的矿物组成和含量、岩石结构构造和含矿性可将太和岩体划分为三个岩相带：下部岩相带、中部岩相带和上部岩相带。下部岩相带主要由辉长岩、橄榄辉长岩、橄榄辉石岩、块状氧化物矿石组成，堆晶矿物主要有橄榄石、斜长石、单斜辉石、Fe-Ti 氧化物，矿物含量变化较大。中部岩相带韵律发育，韵律层主要由位于韵律旋回底部的磷灰石磁铁辉石岩、磁铁辉石岩与旋回上部的辉长岩及磷灰石辉长岩构成。此外，中部岩相带富集磷灰石和钛铁矿是最重要的特征。上部岩相带主要为厚层的磷灰石辉长岩及少量磷灰石磁铁辉石岩夹层构成<sup>[13-14]</sup>(图 2)。

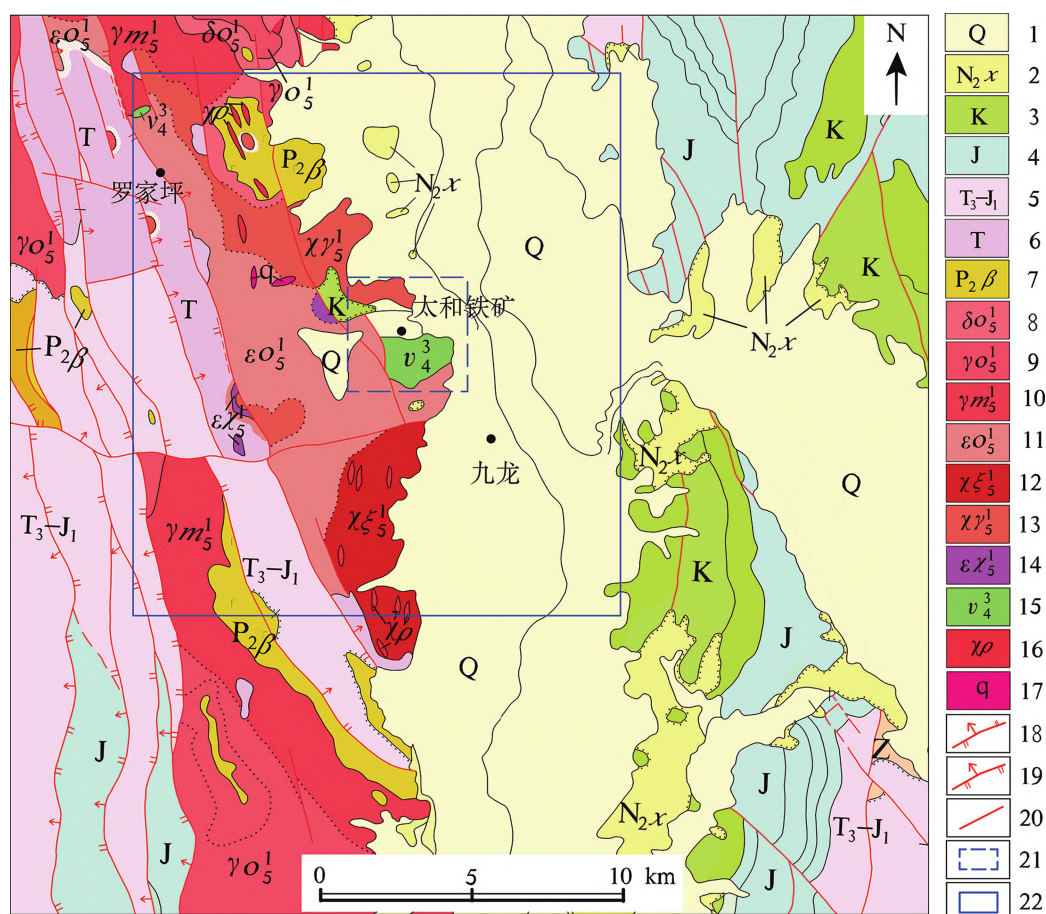


图 1 四川太和钒钛磁铁矿区域地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of vanadium-titanium-magnetite deposit in Taihe, Sichuan

1. 第四系; 2. 新近系昔格达组; 3. 白垩系; 4. 侏罗系; 5. 三叠系—侏罗系; 6. 三叠系; 7. 二叠纪玄武岩; 8. 石英闪长岩; 9. 花岗闪长岩; 10. 二长花岗岩; 11. 碱性石英正长岩; 12. 碱性正长岩; 13. 碱性花岗岩; 14. 碱性石英正长斑岩; 15. 辉长岩; 16. 伟晶岩脉; 17. 石英岩脉; 18. 正断层; 19. 逆断层; 20. 性质不明断层; 21. 太和铁矿区; 22. 研究区



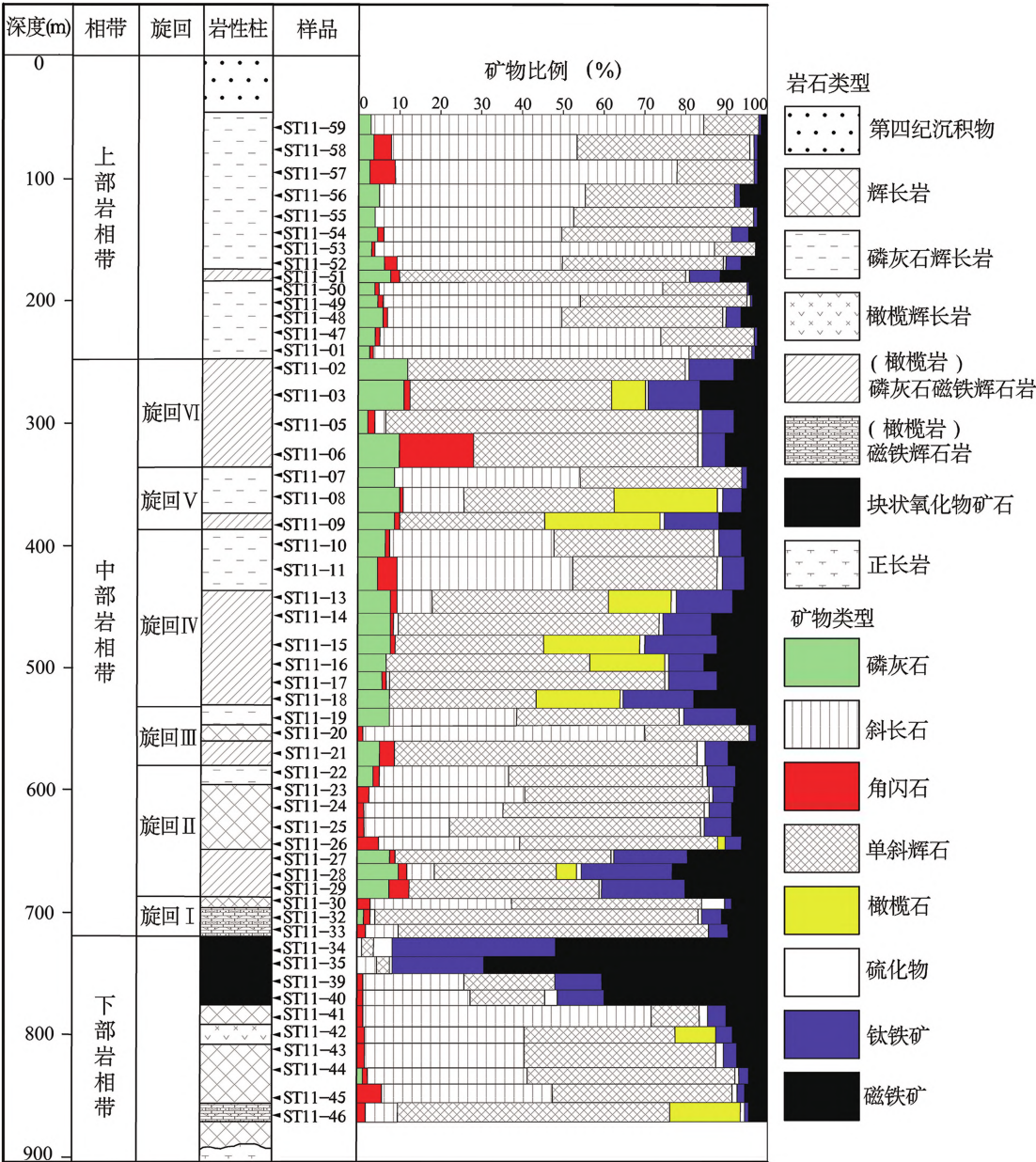


图2 四川太和岩体岩相及矿物组合柱状图<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Column diagram of petrographic and mineralogical assemblages for Taihe rocks in Sichuan<sup>[9]</sup>

辉长岩北侧与碱性花岗岩呈侵入接触，碱性花岗岩呈带状沿着北西向展布；辉长岩西侧与大片碱性石英正长岩呈断层接触。辉长岩中部少量碱性正长岩沿近南北向断裂贯入，穿切太和层状辉长岩。研究区南部分布大片碱性正长岩，与碱性石英正长岩呈断层接触。研究区北侧出露小面积石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等(图1)。二叠纪火山岩，仅出露于罗家坪东侧，岩体多呈单斜或岩盘产出，层状构造发育。伴随基性或超基性岩浆侵入。玄武岩出露明显受近南北向构造带控制的属于大陆拉斑玄武岩。

## 2 物性特征分析

### 2.1 磁性特征

岩(矿)石的磁性特征是连接地球物理与地质的纽带，真实准确的物性资料是开展地球物理解释的基础，由于地下岩(矿)石磁性存在差异，在地球物理场中反映的磁异常特征才有所不同<sup>[15-17]</sup>。综合研究区内已有的岩(矿)石磁性资料<sup>[2]</sup>，将其进行整理分析(表1)，并将该区岩(矿)石磁性特征汇总归纳如下：

区内岩、矿石的磁性特征排列顺序为钒钛磁

表 1  研究区岩(矿)石磁性参数统计<sup>[2]</sup>

Table 1  Parameters for the magnetic properties of rocks and ores in the study area<sup>[2]</sup>

岩石名称	样品数	磁化率 $K$ ( $10^{-5}$ SI)		剩磁 $J_r$ ( $10^{-3}$ A/m)	
		变化范围	常见值	变化范围	常见值
磁铁矿	302	753 ~ 187000	63959	856 ~ 3438	1440
辉长岩(含矿)	25	8200 ~ 16200	9230	149 ~ 312	282
辉长岩	31	1410 ~ 4800	3230	93 ~ 120	105
石英闪长岩	30	28 ~ 4129	2000	26 ~ 110	41
石英正长岩		22 ~ 1057	567	26 ~ 130	61
二长花岗岩	28	49 ~ 452	187	15 ~ 84	44
花岗闪长岩	43	15 ~ 56	26	15 ~ 46	22
正长岩	30	17.2 ~ 57	25	15 ~ 30	18
玄武岩	37	1029 ~ 4053	3028	21 ~ 133	47
砾岩、砂砾岩、粉砂岩、砂岩、泥岩	525	0.1 ~ 9.2	4.6	0	0
前震旦系浅变质岩	30	46 ~ 333	189	5 ~ 32	18
前震旦系中、深变质岩	30	4878 ~ 7200	6039	661 ~ 1800	1230

注：数据来源于文献 [2]。

铁矿、磁铁矿 > 含矿岩体 > 中、深变质岩 > 基性超基性岩、玄武岩 > 中性岩、浅变质岩 > 酸性岩 > 沉积岩。

磁铁矿，区内钒钛磁铁矿磁性最强，它们是引起区内强磁异常的主要因素，磁化率随其矿石中磁铁矿含量不同而变化。磁化率常见范围多大于  $50000 \times 10^{-5}$  SI 以上，有些可达  $100000 \times 10^{-5}$  SI 以上；有一定规模的磁铁矿石可以引起明显的高磁异常。磁铁矿磁性强弱与全铁含量呈明显的正相关关系，矿石品位越高，则磁性就越强<sup>[18]</sup>。钒钛磁铁矿、磁铁矿与玄武岩、基性、超基性岩磁性参数相比，数量级相差 10 倍以上，可为区分矿致与非矿致异常提供物性依据。

岩浆岩类，辉长岩(含矿)属于基性侵入岩，磁性非常强，磁化率常见值  $9230 \times 10^{-5}$  SI，可以引起明显的高磁异常，是利用磁法寻找钒钛磁铁矿的间接目标物；一般辉长岩磁性较强，石英闪长岩、石英正长岩磁性中等，二长花岗岩、花岗闪长岩、正长岩等磁性较弱。

火山岩类，区内常见的火山岩为二叠纪玄武岩，磁性强度与一般辉长岩相近。

沉积岩类，包括第四系冰碛岩和冲积层、坡积层；新近系砾岩、砂砾岩、粉砂岩；白垩系泥岩、砂岩、粉砂岩等。一般来说，沉积岩磁化率比较低，剩余磁化强度基本为零。

变质岩类，因其原岩成分不同，磁化率也会不同，磁化率值变化比较大。区内中、深变质岩磁化率比较高，基本大于基性超基性岩、玄武岩；

浅变质岩磁性一般，磁性强度与中性岩体相近。

2.2  密度特征

区域岩石的密度特征随岩性的变化而变化，随着地层时代由新到老，各时代地层岩石密度呈增大变化趋势。整体规律为磁铁矿 > 岩浆岩 > 变质岩 > 沉积岩(表 2)。

表 2  研究区岩(矿)石密度统计<sup>[2]</sup>

Table 2  Density parameters of rocks and ores in the study area<sup>[2]</sup>

岩石名称	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	
	变化范围	常见值
磁铁矿	3.10 ~ 4.71	3.40
辉长岩(含矿)	2.84 ~ 3.10	2.97
超基性岩	3.02 ~ 3.3	3.14
基性岩	2.67 ~ 3.18	2.94
中性岩	2.78 ~ 2.90	2.81
酸性岩	2.51 ~ 2.73	2.61
碱性岩	2.56 ~ 2.67	2.62
喷出岩(玄武岩)	2.67 ~ 3.04	2.86
砾岩	2.02 ~ 2.80	2.41
砂岩	1.93 ~ 2.93	2.43
前震旦系浅变质岩	1.90 ~ 2.62	2.48
前震旦系中、深变质岩	2.76 ~ 2.89	2.80

注：数据源于文献 [2]。

磁铁矿的密度是最大的，但是由于铁矿体和老地层、岩体、火山岩相比，其质量、规模较小，故而在重力场中不能单独形成局部异常。

岩浆岩密度特征如表 2 所示，密度随岩性的变化而变化，除酸性岩和碱性岩的密度值相同外，

其余几种岩性的密度随着岩石基性程度的增加而增加。变质岩类, 密度特征与变质程度有关, 一般随着变质程度的加深, 岩石的密度逐渐增加。沉积岩的密度随岩性而变化, 在同一岩性中, 一般是新地层到老地层密度值逐渐增加。

### 3 地球物理场特征

#### 3.1 磁场特征

航磁异常场是地下浅部和深部不同深度磁性地质体磁场信息综合反映的结果。由于不同地质体在岩石组成、矿物成分及结构构造等方面存在一定的差异性, 地球磁场磁化作用下产生的磁性特征则不同, 在航磁异常场中反映的磁性强弱、磁异常大小及异常形态等特征亦不同<sup>[19-20]</sup>。高精度航磁数据源于 2014 年航遥中心实测数据<sup>[2]</sup>。

研究区范围内的区域场以低缓平稳的负磁场为主要特征, 场值变化在  $-100 \sim -50$  nT 之间; 在负磁背景场中展布着平缓升高的片状正磁异常场, 整体展布近北西向, 场值变化在  $0 \sim 100$  nT 之间; 在平缓正磁异常场上叠加着几处局部升高正磁异常, 异常呈椭圆状、似椭圆状、浑圆状, 由北向南依次排列, 轴向分别为近东西向、近北西向, 部分正磁异常北侧伴生椭圆状、似椭圆状负异常, 负异常轴向均为近东西向(图 3(a))。

化极转换处理结果是将斜磁化异常转换为垂直磁化异常, 即为将观测面设在磁北极时所观测的航磁异常<sup>[21-23]</sup>。航磁化极垂向一阶导数处理是在化极的基础上进行的, 处理的主要目的是利用航磁异常垂向变化率的差异将浅层局部磁性体的异常特征信息显现出来。经过化极垂向一阶导数处理后, 消除了背景场的影响, 浅层局部地质体的异常特征表现得更加明显, 局部正磁异常的边界特征亦更加清晰, 与出露的岩石边界更为吻合(图 3(c)和(d))。磁场经化极、垂向一阶导数处理后, 能够为圈定磁性地质体的位置和边界提供重要依据。

航磁剩余异常提取是采用空间域非线性曲率滤波法实现的, 方法原理是通过空间域非线性曲率滤波算法计算获得剖面位场的趋势异常, 将该剖面趋势异常从剖面原始异常中减去, 得到剖面位场的剩余异常。从航磁剩余异常提取结果(图 3(b))可以看出, 剩余异常的提取消除了背景场的影响, 分离了叠加异常, 使局部异常的曲线形态特征更加清晰, 特别是已知矿区及其周边地区,

剩余异常曲线多呈现强度较高、梯度较陡的尖峰状正磁异常特征。

#### 3.2 重力场特征

重力异常是地下不同规模、形态和埋深的不均匀地质体的综合响应。通过从重力异常中提取目标地质体异常, 可以探测隐伏矿床、岩体或构造等<sup>[24]</sup>。区内收集了 1:500000 区域重力数据, 区域布格重力异常图(图 2(e))显示, 区内重力场呈现西高东低的趋势, 太和铁矿处于南北走向的梯度带上, 重力异常值处于  $-260 \sim -250$  mGal 之间; 太和西侧重力高值异常区呈似椭圆状沿着近南北向展布。在布格重力图中, 矿致异常不能形成明显的局部重力异常, 是由于铁矿体和老地层、岩体、火山岩相比, 其质量、规模均小, 不能单独形成局部异常。而布格重力异常总体显示的是老地层和岩体异常, 要从中分离出矿异常, 需对布格数据开展位场转换。

重力异常的垂向高阶导数不仅可以突出浅而小的地质体异常、压制区域性深部地质因素的影响来提高局部地质因素分辨能力, 还可以区分水平叠加异常, 确定地质体或构造边界<sup>[24]</sup>。重力垂向二阶导数图中(图 3(f)), 重力高值异常区整体呈南北走向, 其上叠加的局部异常更加明显了, 已知太和铁矿处于相对重力高值区, 异常呈似椭圆状沿着近东西向分布; 已知矿周边的几处局部异常表现为似椭圆状、鼻状的重力高异常, 走向近东西向。

综合上述分析, 对比地质图, 区内大片平缓升高正磁场和重力高值异常区, 均与区内中、深变质岩系组成的结晶基底对应较好, 因结晶基底磁性较强、密度较高, 在磁场和重力场上反映较为明显。其上叠加的局部异常, 多为岩体的反映。已知太和铁矿在磁场上表现为似椭圆状局部升高强磁异常, 在重力场(重力垂向二阶导数场)中表现为相对重力高值区, 其南侧、西北侧叠加在背景场上的局部异常的地球物理场特征与其相似, 亦表现为高磁、高重的特征。已知矿周边地区局部异常范围内, 是否存在隐伏的磁性矿体, 待下一步解释研究。

### 4 重点异常及其找矿意义

区内优选了 5 处重点异常, 即 M47、M47-1、M47-2、M47-3、M47-4 异常, 其中 M47、M47-1、M47-2 三处异常由北向南近于平行排列,



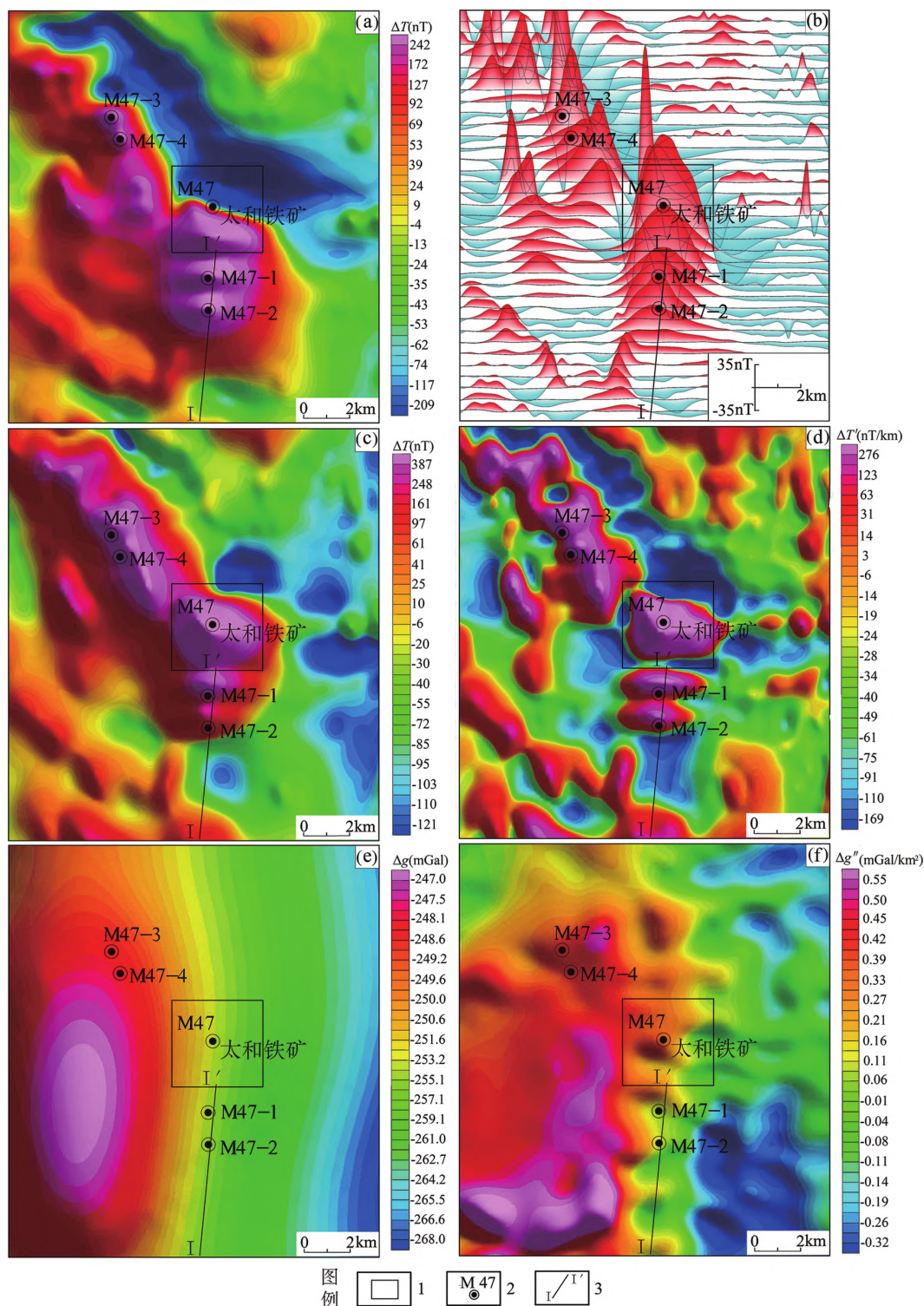


图 3 太和地区地球物理综合图

Fig. 3 Maps showing geophysical information in the Taihe area

(a) 航磁  $\Delta T$  等值线平面图; (b) 航磁剩余异常剖面平面图; (c) 航磁  $\Delta T$  化极等值线平面图; (d) 航磁  $\Delta T$  化极垂向一阶导数等值线平面图; (e) 布格重力异常阴影图; (f) 布格重力异常垂向二阶导数阴影图; 1. 太和铁矿; 2. 航磁异常点及编号; 3. 拟合剖面位置

异常区范围内出露已知钒钛磁铁矿、基性岩和中酸性岩等; M47-3、M47-4 两处异常沿着北北西向依次排列, 地表虽然出露玄武岩及中酸性侵入

岩体, 但是地质成矿条件较好。

#### 4.1 M47 异常

M47 在航磁异常平面图上表现为似椭圆状正

负伴生强磁异常,长轴走向为近东西向(图 3(a));剖面图中,异常曲线显示为尖峰状正磁异常,曲线规则,且梯度较陡,向南异常曲线变得宽缓(图 3(b)),南侧正异常峰值强度最高为 812 nT,北侧伴生负异常峰值强度最低为 -765 nT,异常变化幅值即为 1577 nT;已知太和钒钛磁铁区处于正负磁异常场中;经化极垂向一阶导数处理后(图 3(c)和(d)),正磁异常场强度增加,北侧伴生的负磁异常场强度减弱,整个矿区则完全处于似椭圆状强烈升高正磁异常场中,且磁异常的边界与已知太和钒钛磁铁区出露的层状辉长岩边界较为吻合;在重力场中与重力高值区对应较好(图 3(f))。对比地质图,高磁高重异常区范围与主要出露的华力西期辉长岩较为吻合,磁铁矿体产于辉长岩体内,呈似层状且平行产出。依据实测物性资料(表 1、表 2),钒钛磁铁矿、辉长岩(含矿)磁性非常强、密度非常大,它们在磁场中能引起非常明显的似椭圆状强磁异常,在重力场中亦能引起局部重力高。结合地面踏勘结果,证实 M47 异常与已知太和含钒钛磁铁矿关系密切。

#### 4.2 M47-1、M47-2 异常

M47-1、M47-2 两处异常处于已知矿区南部地区,为 M47 的次级叠加异常,地质成矿位置较好。两处异常形态相似,均为沿东西向展布的椭圆状局部升高正磁异常,异常曲线规律、且宽缓,经过化极垂向一阶导数处理后,依然表现为两处似圆状正异常;在重力场(重力垂向二阶导数场)中表现为鼻状突起的重力高值区附近(图 3(f))。M47-1 航磁异常处于大片石英正长岩出露区,航磁异常强度较高,峰值达 547 nT。依据实测物性资料(表 1),石英正长岩磁性中等,磁化率变化范围为  $22 \times 10^{-5} \sim 1057 \times 10^{-5}$  SI,常见值为  $567 \times 10^{-5}$  SI,仅能引起较为平缓的正磁异常场,可能无法引起 547 nT 的航磁异常;M47-2 航磁异常处于大片正长岩出露区,磁场特征与 M47-1 航磁异常相似,异常强度峰值为 461 nT。依据实测物性资料(表 1),正长岩磁性较弱,磁化率变化范围为  $17.2 \times 10^{-5} \sim 57 \times 10^{-5}$  SI,常见值为  $25 \times 10^{-5}$  SI,在磁场上仅能引起低缓的磁异常场,亦无法引起 461 nT 的航磁异常。通过地面踏勘,在已知钒钛磁铁矿附近地质图标示的正长岩、玄武岩分布区发现了大面积的辉长岩,由此推测太和辉长岩体的南侧两处异常区内可能存在隐伏或未发现的辉长岩(含矿),对于寻找钒钛磁铁矿具有一定

的指示作用。根据上述分析,对 M47-1、M47-2 两处航磁异常开展定量解释分析,使用的软件为航遥中心自主研发的高精度重磁异常剖面解释系统(GMVPS)。该软件是基于航磁剖面 2.5D 反演技术,利用一个或多个模型来模拟地下地质情况,所选模型为水平有限长的棱柱体,截面为任意多边形,其任意组合可以逼近任意形态的地质体,通过调整模型的形状直到引起异常曲线与实测曲线差异最小,得到最终的反应模型<sup>[25-27]</sup>。假设 M47-1、M47-2 两处航磁异常为地表出露的中酸性岩体及隐伏基性岩引起的,参考野外实测磁化率数据,对航磁异常剖面曲线进行 2.5D 反演计算,图 4 为 I-I' 剖面模型,各地层、岩石、矿物磁性参数如表 1、表 3 所示,辉长岩磁化强度约为 3.59 A/m,石英正长岩磁化强度约为 0.018 A/m,正长岩磁化强度约为 0.011 A/m。

(1)“中酸性侵入岩+隐伏基性侵入岩”组合模型。

假设 M47-1、M47-2 两处航磁异常均与隐伏的辉长岩(不含矿)有关。依据野外实测磁化率数据,建立“中酸性侵入岩+隐伏基性侵入岩”组合模型对实测航磁异常曲线进行反演计算,各地层、岩石、矿物磁性参数如表 1、表 2 所示。反演结果如图 3(a)所示,两处辉长岩( $J_3$ 、 $J_4$ )引起的航磁异常约为 100 nT,仍然不及 M47-1、M47-2 航磁异常强度值(547 nT、461 nT),由此说明,两处航磁异常不仅与隐伏基性岩有关,可能还与基性岩中的磁性更强的地质体有关。

(2)“中酸性侵入岩+隐伏基性侵入岩+推断磁性矿体”合模型。

模型①的结论证实了 M47-1、M47-2 两处航磁异常范围内隐伏着磁性更强的地质体,由于两处异常邻近已知太和钒钛磁铁矿(M47 航磁异常),具备一定的地质成矿条件。根据航磁特征,由“已知”推导“未知”,推断 M47-1、M47-2 两处航磁异常可能还与隐伏的磁性矿体有关,即认为两处异常可能为地表出露的中酸性侵入岩及隐伏的辉长岩和磁铁矿共同引起的。利用 GeoProbe 软件中的 Eulers 深度反演模块,估算推断隐伏强磁性体顶面埋深 0.4~0.7 km。

根据上述推论,建立“中酸性侵入岩+隐伏基性侵入岩+推断磁性矿体”组合模型对实测航磁异常曲线再进行进一步反演计算, $J_3$ 、 $J_4$  两处辉长岩中,增加磁性矿体,各地层、岩石、矿物磁性参数



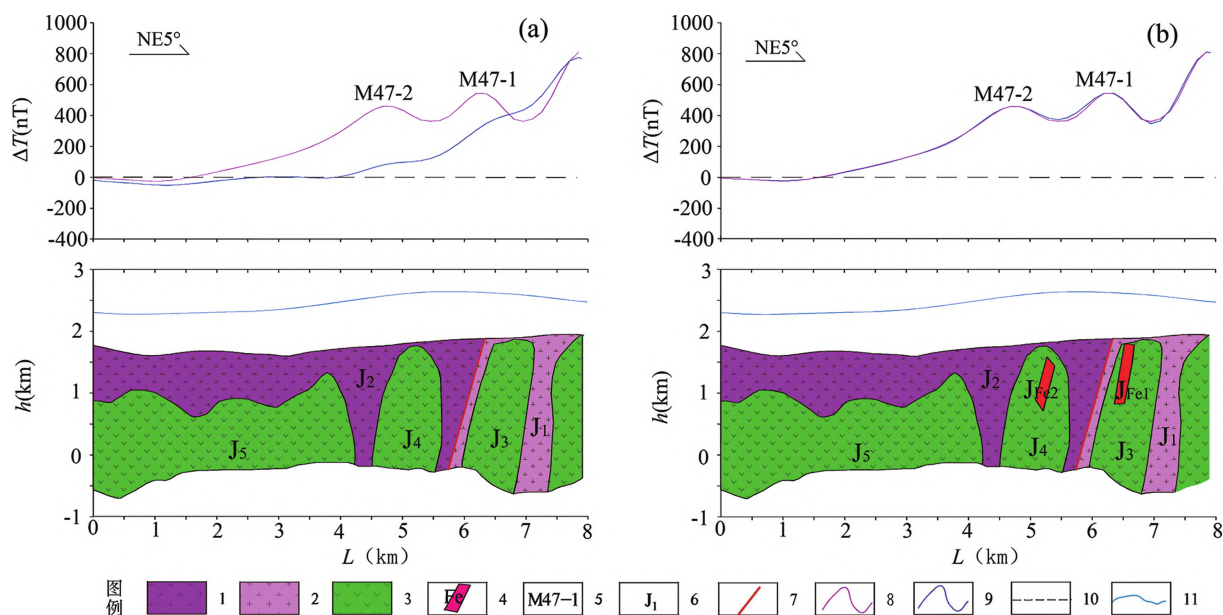


图4 航磁异常剖面(I-I')拟合组合模型

Fig. 4 Combined models for fitting aeromagnetic anomaly profile I-I'

(a)“中酸性侵入岩+隐伏基性侵入岩”组合模型；(b)“中酸性侵入岩+隐伏基性侵入岩+推断磁性矿体”组合模型；

1. 正长岩；2. 石英正长岩；3. 辉长岩；4. 推断铁矿体；5. 异常编号；6. 岩(矿)体模型编号；7. 断层；8. 实测曲线；9. 拟合曲线；10. 零值线；11. 飞行轨迹

表3 航磁异常剖面拟合各模型参数<sup>[2]</sup>Table 3 Model parameters used for the fitting of the aeromagnetic anomaly profiles<sup>[2]</sup>

岩(矿) 体模型 编号	推断地质体	磁化方 向(°)	有效磁 化强度 ( $10^{-3}$ A/m)	模型截 面积 ( $\text{km}^2$ )	模型 长度 (km)
J <sub>1</sub>	碱性石英正长岩	42.9	17.95	3.32	3.7
J <sub>2</sub>	碱性正长岩	42.9	10.89	6.88	3.0
J <sub>3</sub>	辉长岩	40.0	3591.00	1.52	3.0
J <sub>4</sub>	辉长岩	40.0	3591.00	0.90	3.0
J <sub>5</sub>	辉长岩	40.0	3591.00	5.32	3.5
J <sub>Fe1</sub>	推断隐伏磁铁矿	32.0	19452.00	0.19	2.45
J <sub>Fe2</sub>	推断隐伏磁铁矿	32.0	19452.00	0.17	2.45

依然如表1所示。反演结果如图3(b)所示，M47-1航磁异常是由出露的石英正长岩(J<sub>1</sub>)、隐伏的辉长岩(J<sub>3</sub>)和推断隐伏磁铁矿(J<sub>Fe1</sub>)共同引起的，M47-2航磁异常则是由出露的正长岩(J<sub>2</sub>)、隐伏的辉长岩(J<sub>4</sub>)和推断隐伏磁铁矿(J<sub>Fe2</sub>)共同引起的。M47-1推断磁性矿顶面埋深约0.5 km，向深部延伸为0.8~1.0 km，估算矿体资源量总计2.41亿吨；M47-2推断隐伏磁性矿体为透镜状，其埋深为0.3~0.6 km，向深部延伸0.3~0.5 km，估算资源量2.28亿吨，均具有一定的找矿潜力。

#### 4.3 M47-3、M47-4异常

M47-3、M47-4航磁异常组合特征与M47、

M47-1、M47-2航磁异常组合特征基本相似。M47-3、M47-4两处航磁异常处于太和铁矿区的西北部，在航磁平面图上M47-3、M47-4航磁异常形态呈椭圆状、似椭圆状沿着北北西向依次排列，异常长轴走向近东西向；剖面图上，局部异常曲线为梯度较陡的尖峰状正磁异常，且向南逐渐变得宽缓。M47-3航磁异常峰值强度最高为458 nT，北侧伴生负异常峰值强度最低为-308 nT，异常幅值即为766 nT；M47-4航磁异常为M47-3的叠加异常，异常峰值强度最高为300 nT。经化极垂向一阶导数处理后，航磁局部异常形态及边界显示得更加清晰。在重力场(重力垂向二阶导数场)中，两处异常处于相对重力高值区(图3(f))。异常范围内出露花岗岩、石英闪长岩及二叠纪玄武岩等，两处局部异常组合形态与M47-1、M47-2两处航磁异常近似，且地质成矿条件良好，亦可能存在隐伏或未发现的辉长岩，具有一定的找矿意义，应予以重视。

## 5 结 论

(1)太和地区矿致异常地球物理特征：5处重点异常(M47、M47-1、M47-2、M47-3、M47-4)，磁场上表现为椭圆状、似椭圆状局部升高正磁异常，且北侧伴生负异常；经过化极垂向一

阶导数处理后,消除了背景场的影响,磁性矿体的边界特征更加明显;在重力垂向二阶导数场中,多反映为鼻状突起、似椭圆状局部重力高值异常。这些特征对于研究区内寻找隐伏磁性矿体具有一定的指示作用。

(2)经过地面踏勘、定性分析及定量计算结果表明,M47-1、M47-2异常地表出露的中酸性侵入岩的磁性不足以引起如此强度的异常,推断为隐伏基性侵入岩(含矿)引起的,经过定量分析,估算资源量4.69亿吨,具有一定的找矿潜力,值得进一步深入工作。建议在M47-1、M47-2异常区开展进一步找矿工作部署,部署地面物探、化探等工作,并开展钻探验证。

(3)鉴于M47-3、M47-4航磁异常组合特征与M47、M47-1、M47-2异常组合形态近似,地质成矿环境较好,推断两处异常范围内可能存在隐伏的磁性矿体,并具有一定的埋深,应予以重视,建议对两处异常开展地面三级查证工作,寻找与基性侵入岩相关的钒钛磁铁矿。

(4)异常推断解释是具有多解性的,在解释过程中已经充分地考虑了地质成矿规律、岩矿石的物性变化范围等因素,尽量减少多解性,航磁异常定量反演结果作为磁异常所反映的磁性体的一种近似估计。本文的研究成果可为研究区下一步找矿工作部署提供参考。

## 参考文献:

- [1] 魏宇,郭耀文,柳维,等.西昌太和钒钛磁铁矿矿体特征及成因[J].四川地质学报,2014,34(3):368-372.
- [2] 张永军,邓茂盛,李皎皎,等.攀枝花—安益地区1:5万航磁调查成果报告[R].北京:中国国土资源航空物探遥感中心,2015:57-65.
- [3] XUE Y, JING L, SONG T. A study of Taihe iron deposit in Sichuan, China Based on magnetic anomalies [M] //International Geophysical Conference. Qingdao: Society of Exploration Geophysicists and Chinese Petroleum Society, 2017: 477-480.
- [4] 魏宇,柏万灵,李松键,等.四川省西昌市太和钒钛磁铁矿地质特征及找矿远景[J].四川地质学报,2012,32(增):44-50.
- [5] 卢记仁,张光弟,张承信,等.攀西层状基性超基性岩体岩浆类型及成因[J].矿床地质,1987,6(2):1-15.
- [6] 艾羽,张招崇,王福生,等.攀枝花层状辉长质岩体的微量元素和锆钼铅氧同位素系统:地幔源区和矿床成因的证据[J].地质学报,2006,80(7):995-1004.
- [7] 余宇伟,宋谢炎,于宋月,等.矿物成分对四川太和钒钛磁铁矿床成因的指示意义[J].矿物学报,2013,33(增):120.
- [8] 孙自明,卞昌蓉,刘光祥.峨眉山地幔柱主要研究进展及四川盆地二叠纪成盆动力学机制[J].现代地质,2023,37(5):1089-1099.
- [9] 张招崇,董书云.大火成岩省是地幔柱作用引起的吗?[J].现代地质,2007,21(2):247-254.
- [10] 张宏辉,袁永盛,余杨忠,等.扬子板块西缘中生代—新生代碰撞造山事件的记录:来自峨眉山玄武岩的锆石U-Pb同位素证据[J].现代地质,2021,35(5):1155-1177.
- [11] 陈娜,龙训荣,韦绍裔.四川西昌太和矿区磁异常特征及找矿意义[J].四川有色金属,2017(2):8-10,13.
- [12] 刘绍裕.四川西昌地区基底结构初探[J].天然气工业,1994,14(6):18-23.
- [13] 余宇伟.四川太和层状岩体及其富磷灰石钒钛磁铁矿床成因[D].北京:中国科学院大学,2015.
- [14] HOU T, ZHANG Z C, ENCARNACION J, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Taihe gabbroic intrusion associated with Fe-Ti-oxide ores in the Panxi district, Emeishan Large Igneous Province, southwest China [J]. Ore Geology Reviews, 2012, 49: 109-127.
- [15] 郭友钊.矿物岩石物理性质在找矿勘探中的应用[J].国外地质勘探技术,1991(增):36-43.
- [16] 刘士毅,田黔宁,赵金水,等.解决物探异常解释多解性的一次尝试[J].物探与化探,2010,34(6):691-696.
- [17] 何敬梓,范正国,黄旭钊,等.红格铁矿三维反演与地质建模[J].地质与勘探,2015,51(6):1049-1058.
- [18] 姜德波,宋国玺,李楠,等.磁法在我国矿产预测中的应用[J].地球物理学进展,2008,23(1):249-256.
- [19] 管志宁.地磁场与磁力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [20] 熊盛青,于长春,睦素文,等.中高山区高精度航磁方法技术[M].北京:地质出版社,2009.
- [21] 乔鹏.地面高精度磁测在航磁异常查证中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2012.
- [22] 范正国,黄旭钊,熊盛青,等.磁测资料应用技术要求[M].北京:地质出版社,2010.
- [23] 范正国,黄旭钊,谭林,等.鞍山地区地质构造及深部铁矿[J].地质与勘探,2013,49(6):1153-1163.
- [24] 曾琴琴,王永华,李富,等.重力异常垂向二阶导数在攀西裂谷特征分析中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(1):29-33.
- [25] 葛藤菲,范正国,黄旭钊,等.攀枝花钒钛磁铁矿深部成矿潜力及找矿方向的航磁资料研究[J].地质与勘探,2015,51(6):1041-1048.
- [26] 葛藤菲,范正国,黄旭钊等.攀枝花矿区航磁异常2.5D人机交互反演[M].中国地球物理学会.2015年中国地球科学联合学术年会论文集.北京:中国地球物理学会,2015:641-644.
- [27] 杨旺东,高福磊,王功文,等.四川红泥坡铜矿床三维地质建模及控矿构造演化的新认识[J].现代地质,2020,34(3):598-608.